

# 熱帯積雲対流活動に果たす エントレインメントの役割

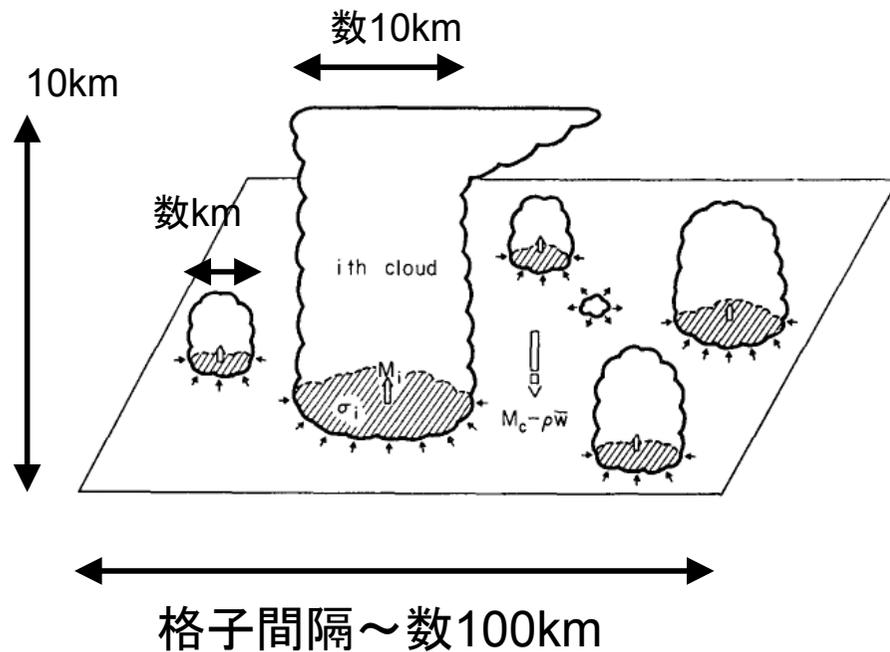
JAMSTEC地球環境変動領域

千喜良 稔

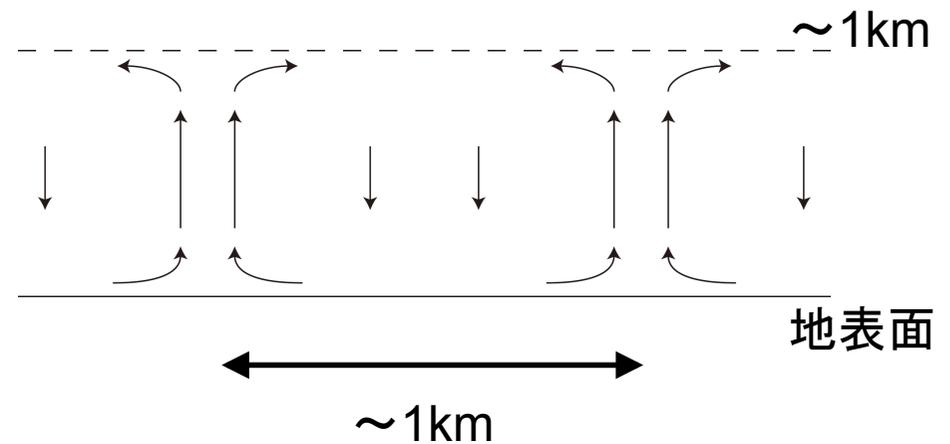
## パラメタリゼーションとは？

モデルの格子間隔(～数100km)では解像できない小さな現象の統計的な振る舞いを、簡単な数理モデルとして理論化したもの

### 積雲パラメタリゼーション

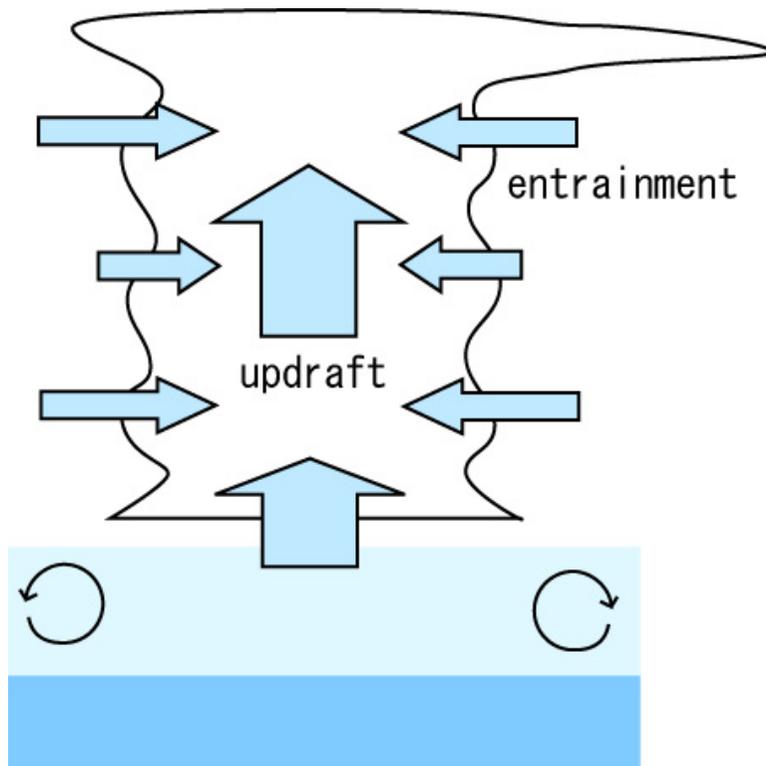


### 境界層パラメタリゼーション



# (水平) エントレインメント率とは？

Entraining-Plumeモデル



$$\frac{\partial M}{\partial z} = \varepsilon M$$

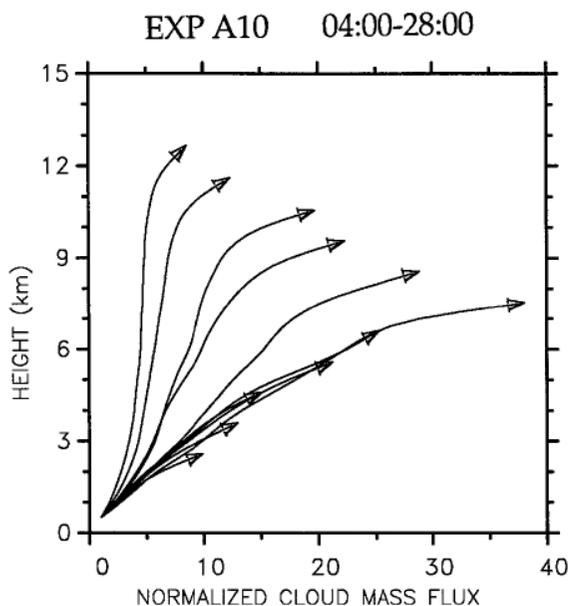
$$\varepsilon = \frac{1}{M} \frac{\partial M}{\partial z}$$

$M \equiv \rho \sigma w$  : mass flux

$\varepsilon$  : entrainment rate

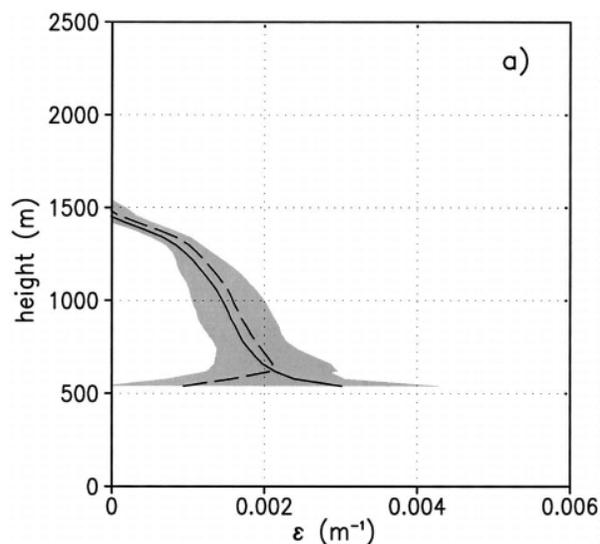
- 深い積雲でも浅い積雲でも水平エントレインメント率は雲底と雲頂付近で大きくなる傾向にある (Lin and Arakawa, 1997; Lin, 1999; Siebesma et al., 2003; Stevens et al., 2001; Murata and Ueno, 2005)。

質量フラックス



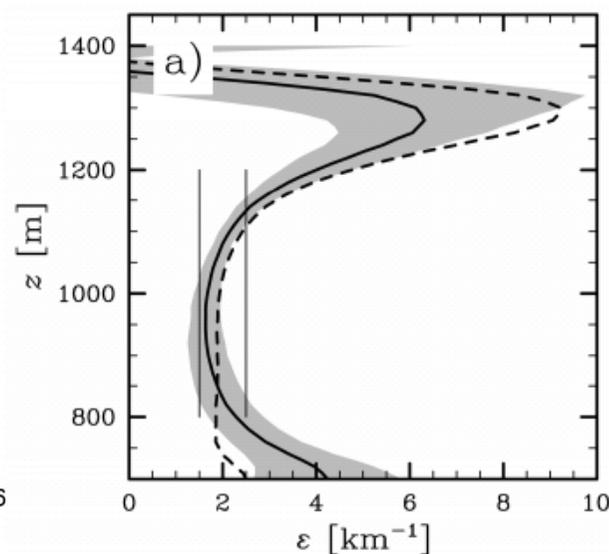
Lin and Arakawa (1997)

エントレインメント率  
(shallow convection)



Siebesma et al. (2003)

エントレインメント率  
(stratocumulus topped  
trade cumulus)



Stevens et al. (2001)

- エントレインメント率は温度の鉛直構造 (Lin, 1999) や、大気の湿潤度 (Stirling, 2008) に依存して変化する。水平風の変化に対してはあまり敏感でない (Lin, 1999)。
- 積雲対流スキームでは、鉛直一様の固定したエントレインメント率が用いられてきた (Arakawa and Schubert, 1974; Tiedtke, 1989)

# プリュームにおける古典的なエントレインメントの考え方

- ・ビジネスク流体
- ・中立成層
- ・浮力の点源によって維持されるプリューム

## 相似解

$$\bar{w} = c_1 F^{1/3} z^{-1/3} \quad (\text{鉛直速度})$$

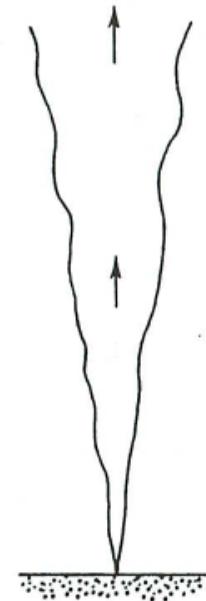
$$\bar{B} = c_2 F^{2/3} z^{-5/3} \quad (\text{浮力})$$

$$R = c_3 z \quad (\text{半径})$$

室内実験でつくられた  
プリュームの結果とよく一致する。

$$\varepsilon = \frac{1}{M} \frac{\partial M}{\partial z} \quad M \propto \pi R^2 \bar{w} \quad \text{より}$$

$$\varepsilon \propto z^{-1} \propto R^{-1}$$



積雲の場合、半径は鉛直にあまり変化しないので、  
エントレインメント率も一定であろうと考えられた。

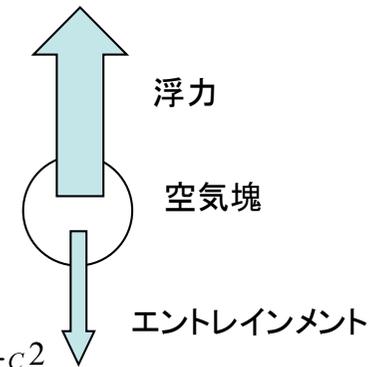
# エントレインメント率の見積もり

## Gregory (2001)の方法

鉛直速度の運動方程式 + 連続の式で定常状態を仮定

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \bar{w}^{c2}}{\partial z} = g \left( \frac{\overline{T'_v}}{\overline{T_v}} - l \right)^c - \frac{1}{\sigma \rho} \left( \frac{\partial \sigma \rho \overline{w'^2}^c}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial p'}{\partial z} \right)^c - g \left( \frac{p'}{\bar{p}} \right)^c - \epsilon \bar{w}^{c2}$$

雲内鉛直速度
浮力
雲内乱流エネルギー
圧力擾乱項
エントレインメント



—  $c$  : 雲内平均       $\sigma$  : 雲の占有面積

仮説: 浮力の仕事のある割合がエントレインメントのプロセスによって消費される。

or

浮力の仕事のある割合がエントレインされる空気塊を加速するのに使われる。

(Grant and Brown, 1999)

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \overline{w}^{c2}}{\partial z} = B - \frac{1}{\sigma \rho} \left( \frac{\partial \sigma \rho \overline{w'^2}^c}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial p'}{\partial z} \right)^c - g \left( \frac{p'}{\bar{p}} \right)^c - \varepsilon \overline{w}^{c2}$$

$$= aB - \varepsilon \overline{w}^{c2} - \frac{1}{\tau_z} \left( \frac{\overline{w}^{c2}}{2} \right) \quad B : \text{浮力}$$

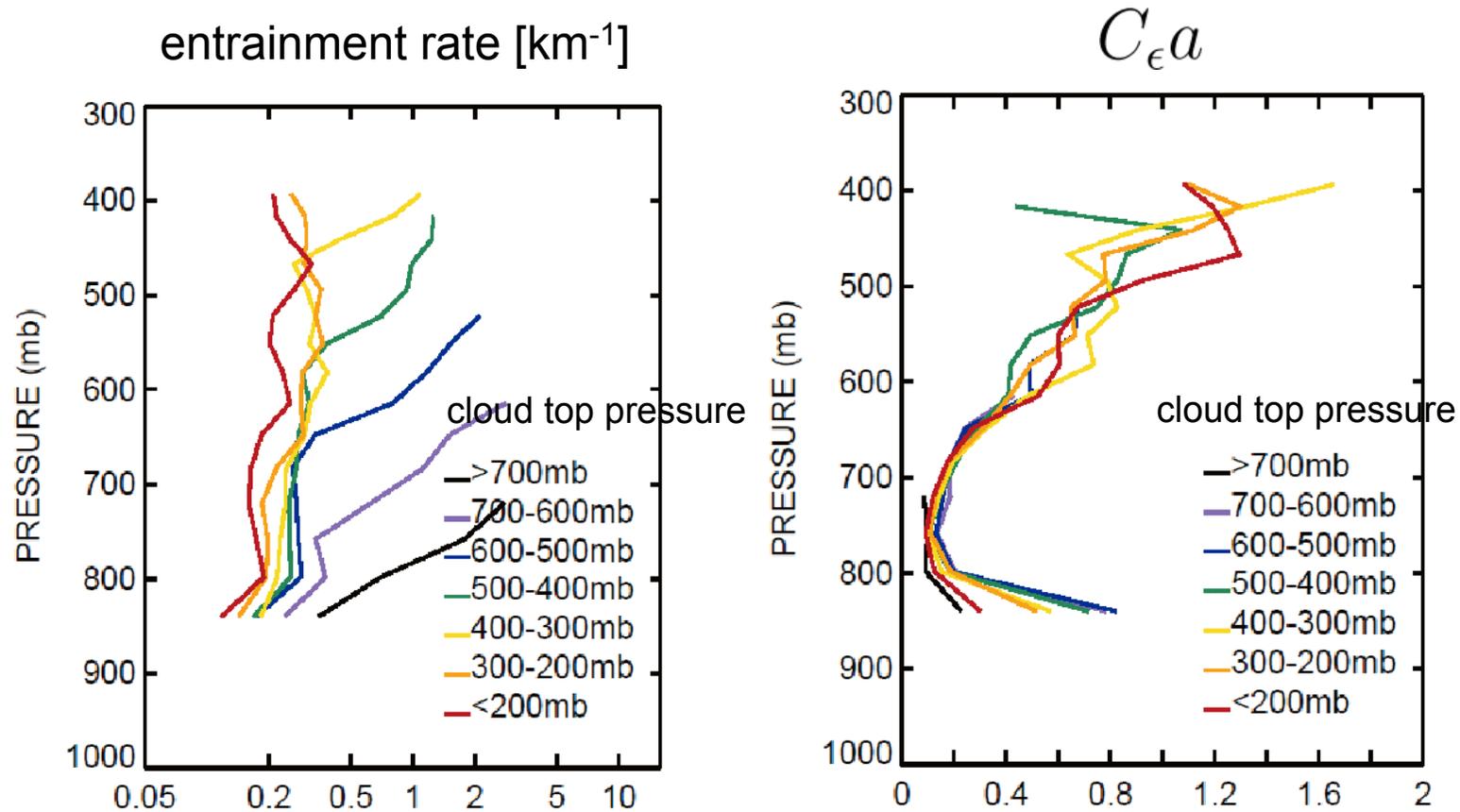
$$a = 0.15 \quad \tau_z = 10 [km]$$

エントレインメント率は以下の式で見積もられる。

$$\varepsilon \overline{w}^{c2} \cong C_\varepsilon \times aB$$

$$\varepsilon \cong C_\varepsilon \frac{aB}{\overline{w}^{c2}} \quad C_\varepsilon = 0.6$$

Del Genio and Wu (2010)は、雲解像モデルを用いて、この仮説がうまく機能することを確かめた。ただし、係数が鉛直に変化する。



From Del Genio and Wu (2010)

$$\epsilon = C_{\epsilon} a \frac{B}{\hat{w}^2}$$

本研究では、 $C_{\epsilon} a$  には固定値を与えている。

## プリュームの相似解

$$\bar{w} = c_1 F^{1/3} z^{-1/3} \quad (\text{鉛直速度})$$

$$\bar{B} = c_2 F^{2/3} z^{-5/3} \quad (\text{浮力})$$

$$R = c_3 z \quad (\text{半径})$$

$$\varepsilon \propto z^{-1} \propto R^{-1}$$

$$\frac{\bar{B}}{\bar{w}^2} \propto z^{-1}$$

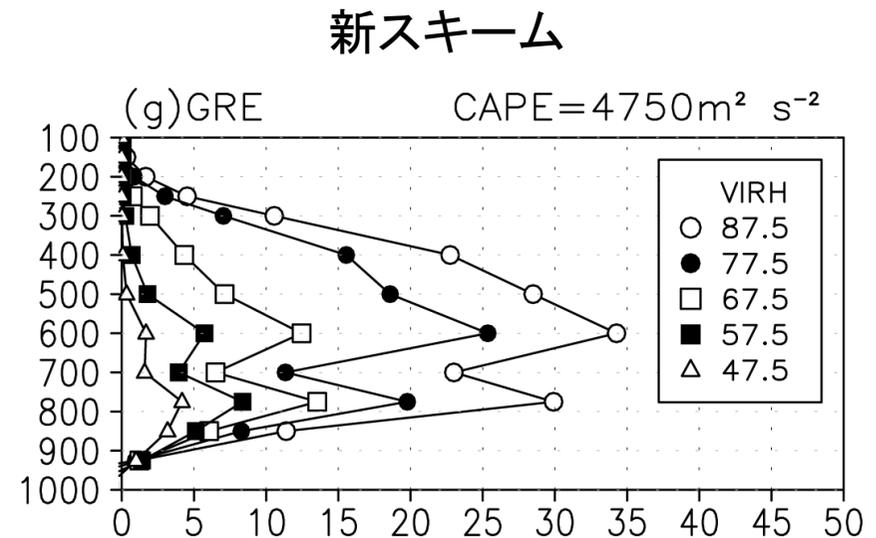
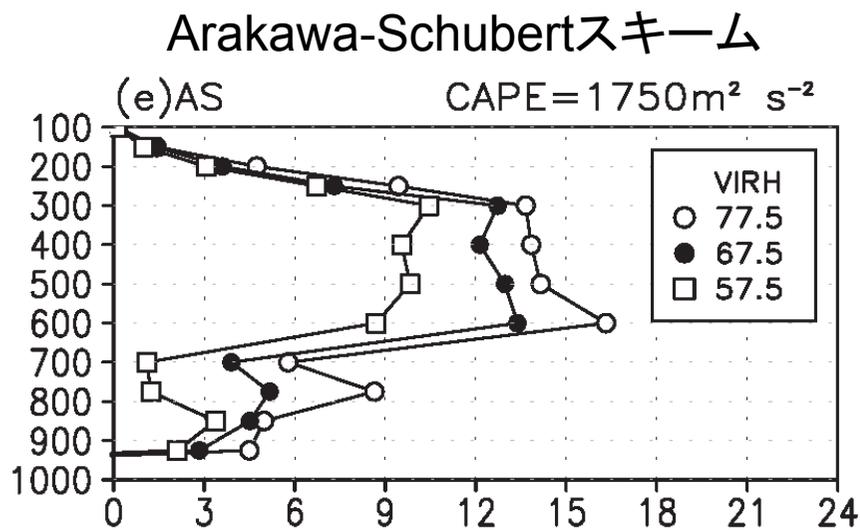
すなわち、

$$\varepsilon \propto \frac{\bar{B}}{\bar{w}^2} \quad \text{も成立している。}$$

Arakawa-Schubertスキームをベースにし、エントレインメント率としてGregory (2001)の定式化を採用したパラメタリゼーションを開発し、GCMで実験を行った。

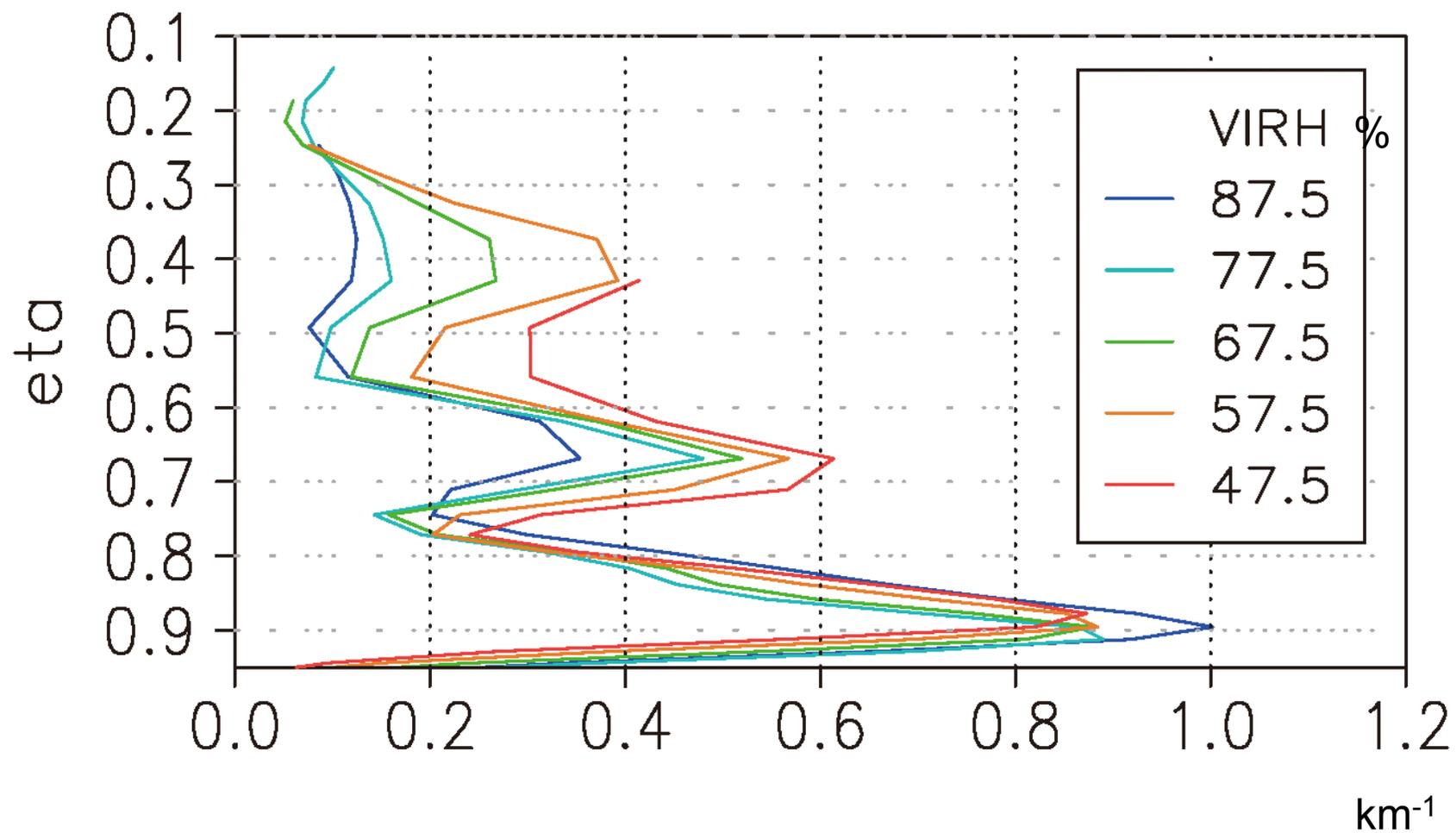
(Chikira and Sugiyama 2010, Chikira 2010)

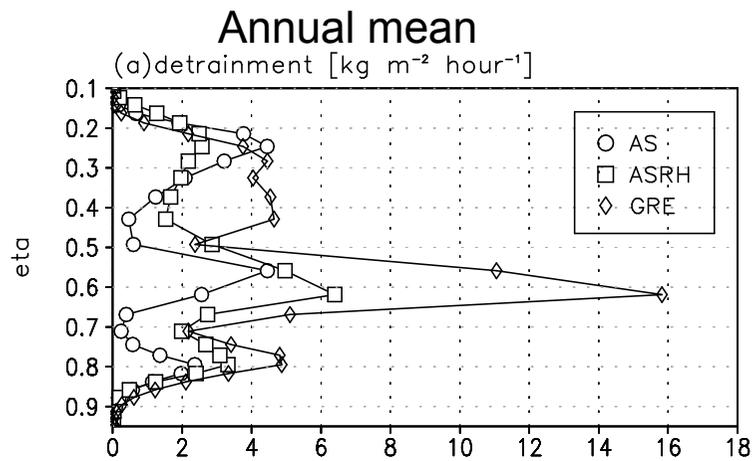
## 相対湿度に対する積雲加熱の依存性



自由大気が乾燥しているときに、対流活動が抑制される。

# CAPEを固定してVIRHを変化させたときの エントレインメント率の変化



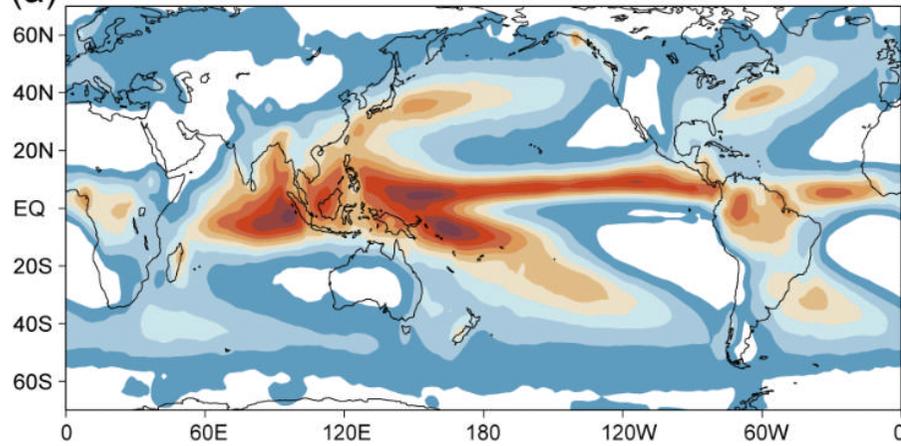


(10S-10N)

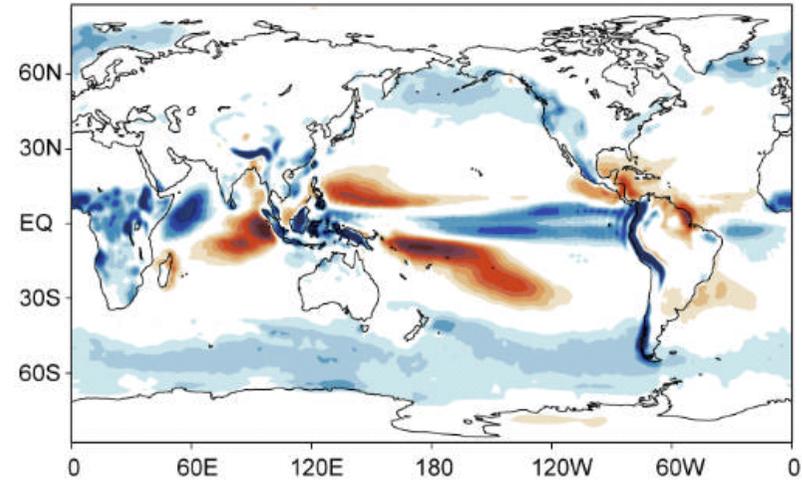
対流圏中層でのデトレインメントが大きく増える。

# Annual mean precipitation (CGCM)

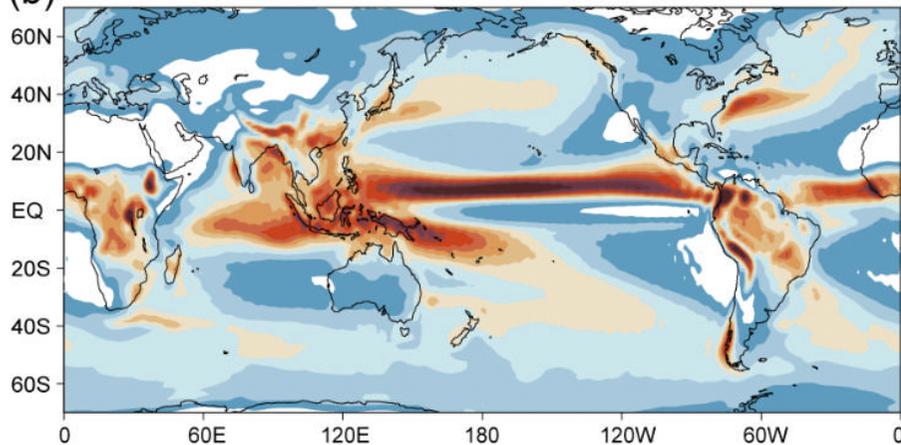
(a) CMAP



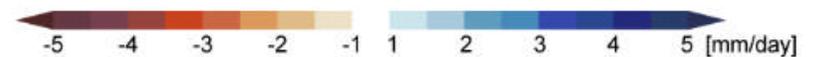
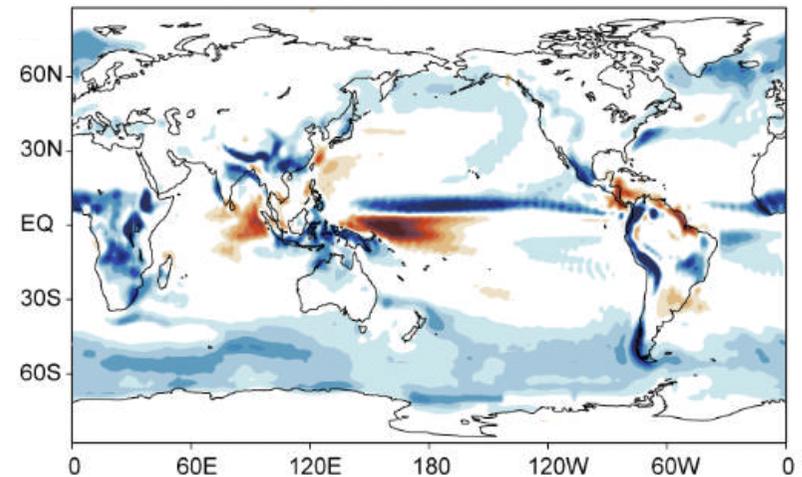
MIROC3-T106 (bias)



(b) MIROC5-T85

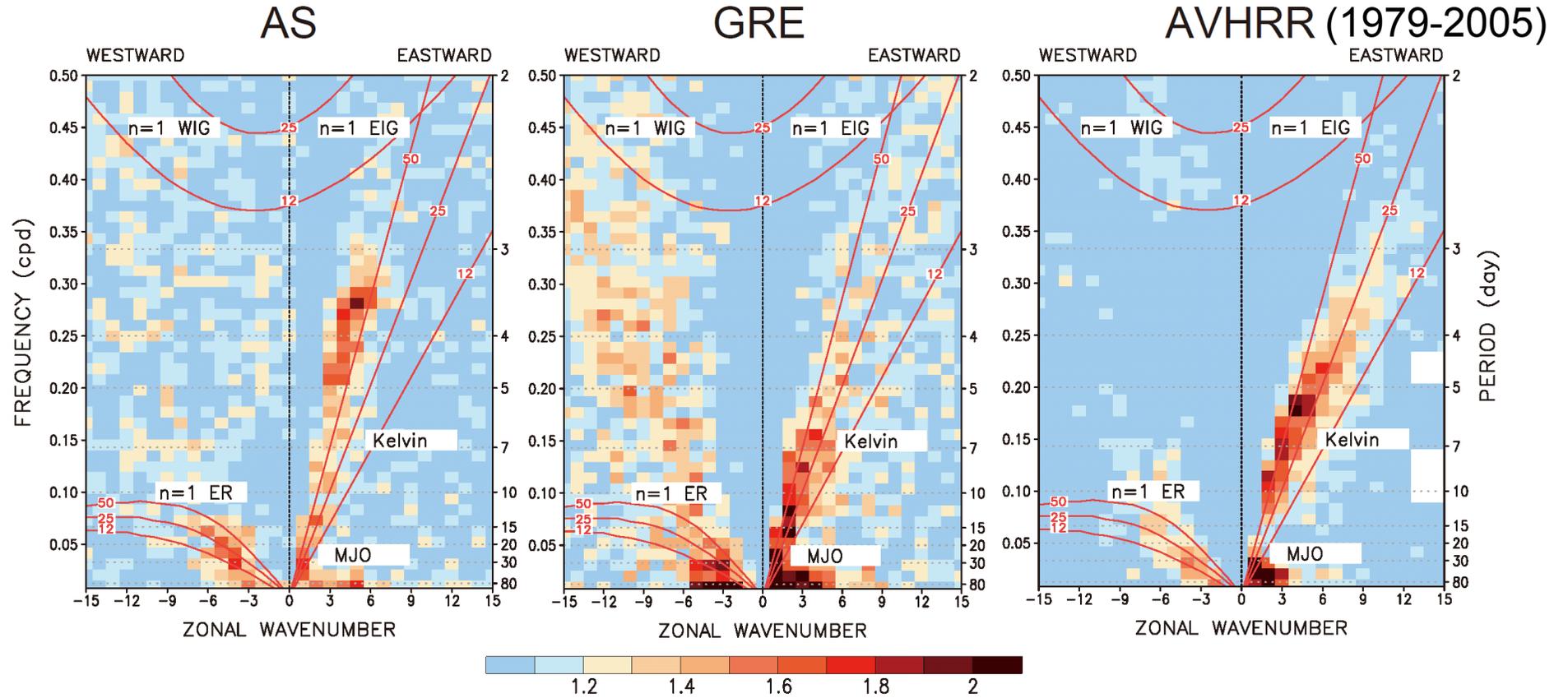


MIROC5-T85 (bias)



# 水平波数-振動数パワースペクトル(10S-10N;南北対称成分)

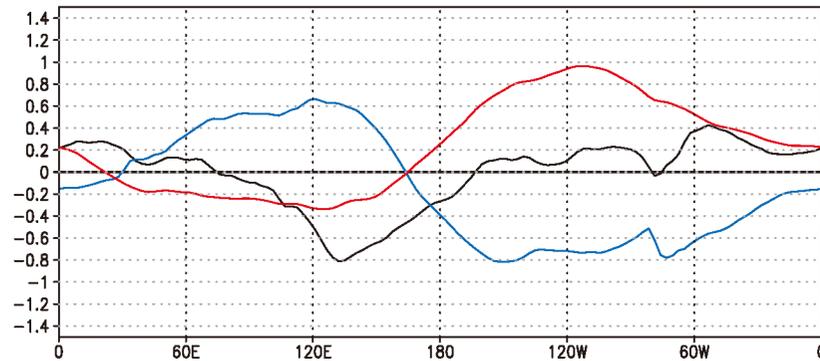
\*Wheeler and Kiladis (1999)に従い、バックグラウンドの値で割ったもの



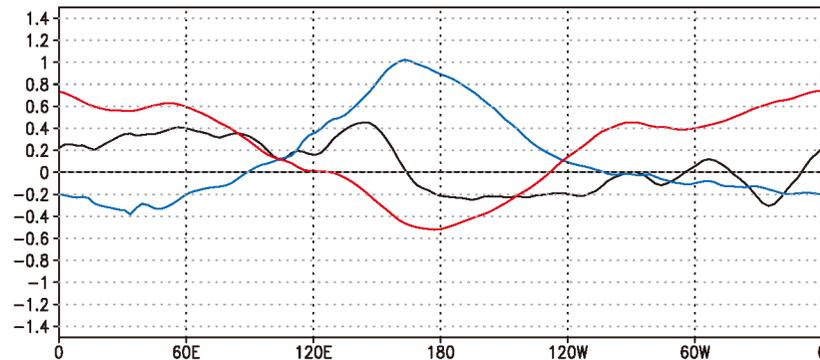
# Combined EOF of 20-100day bandpass filtered OLR, U850 and U200 (15S-15N)

MIROC-AGCM(T42)

(a) 1st mode (19.96%)

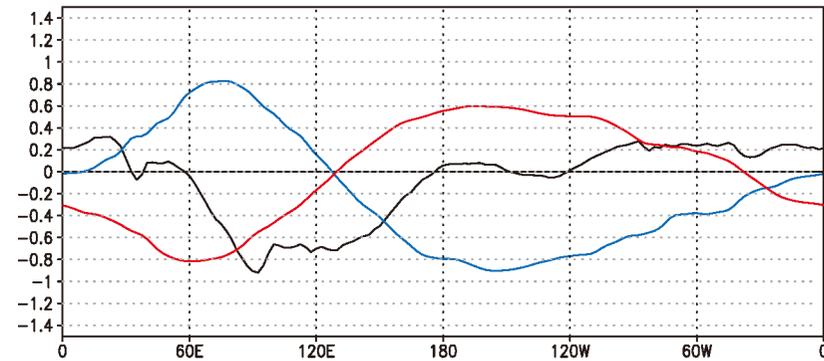


(c) 2nd mode (14.51%)

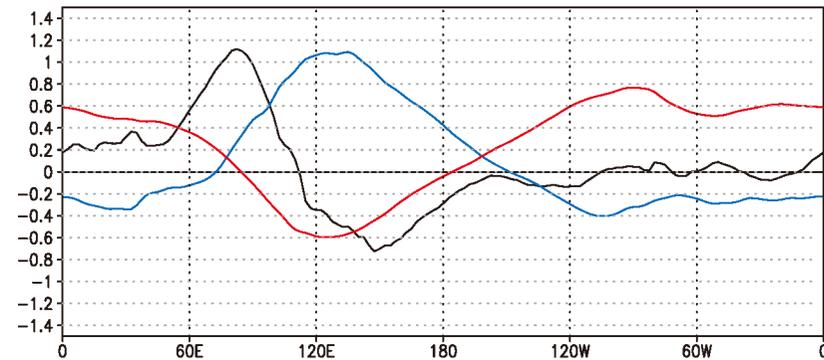


AVHRR+NCEP (1979-2005)

(b) 1st mode (22.2%)



(d) 2nd mode (20.9%)

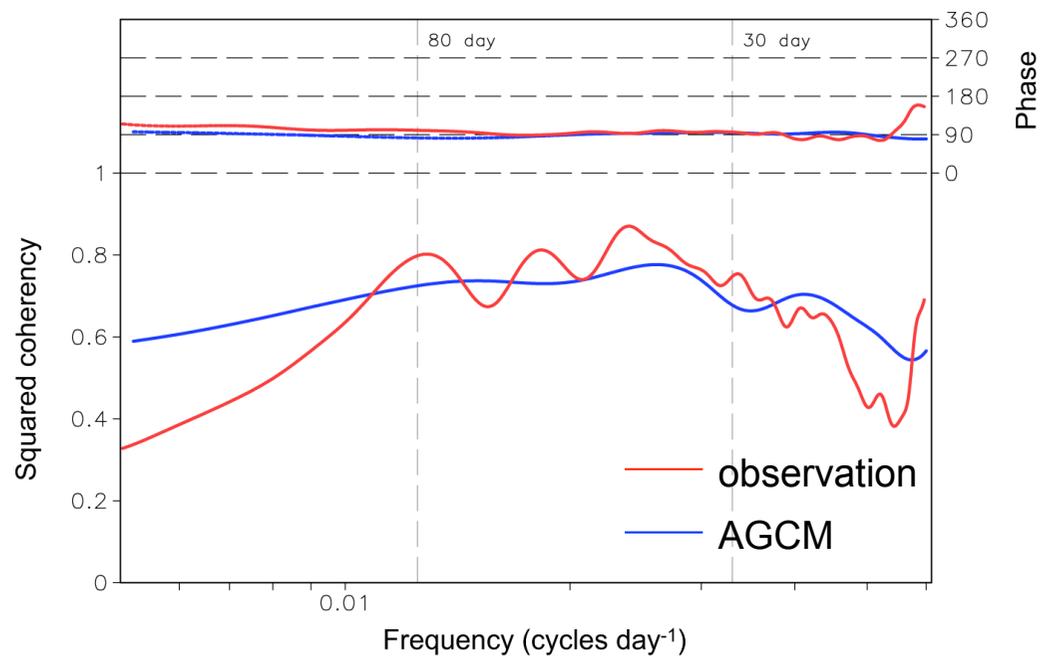


— OLR

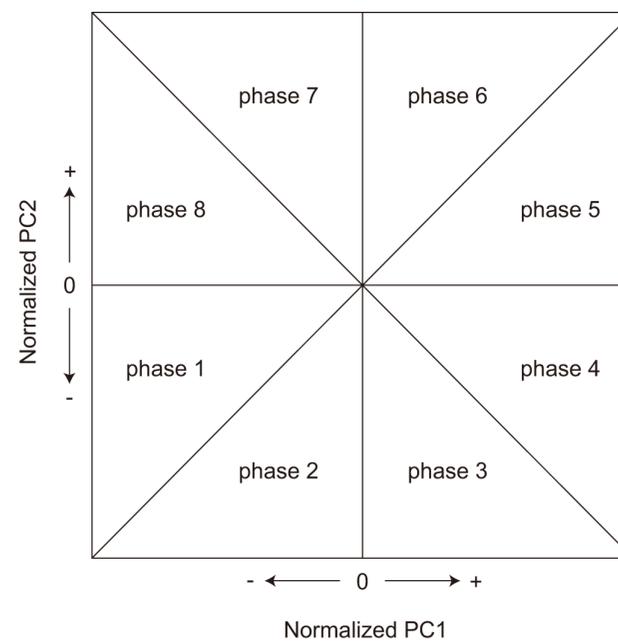
— U850

— U200

## Squared coherency and phase difference of first and second modes

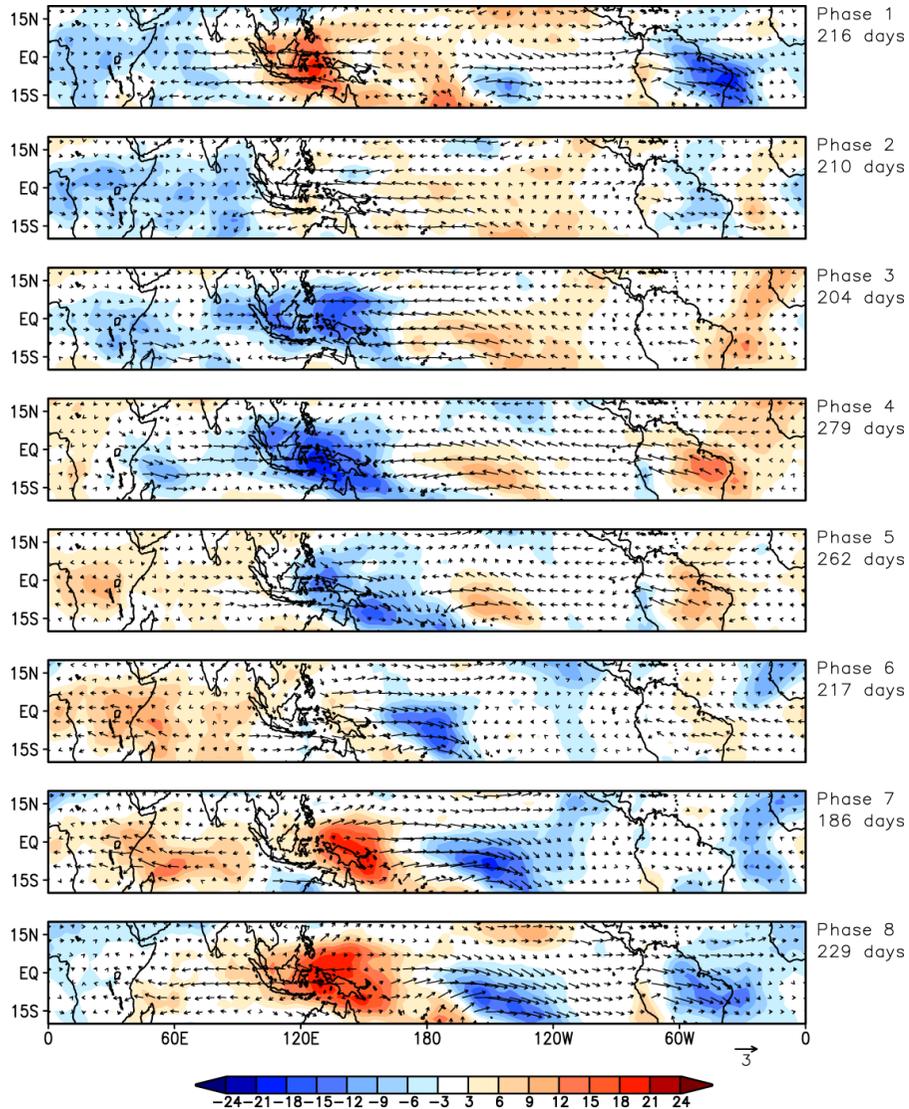


## Definition of phase

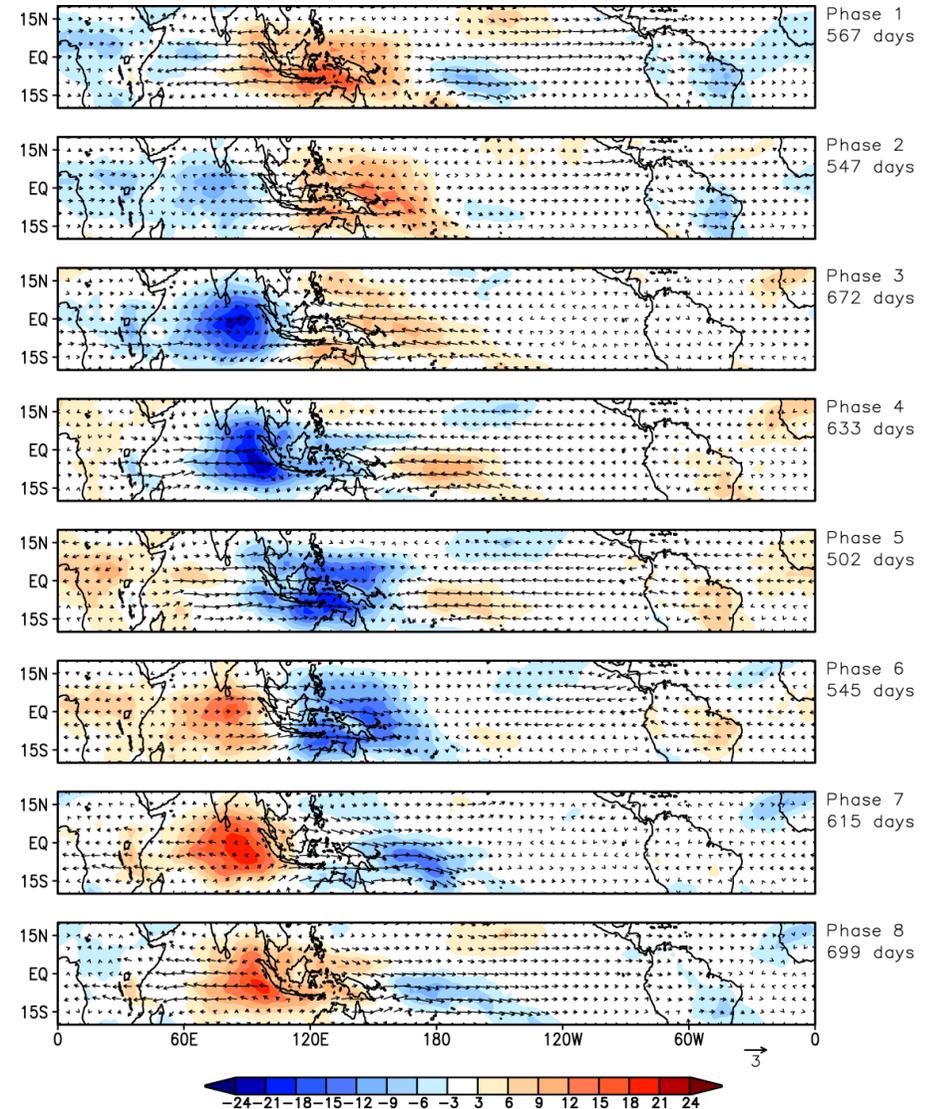


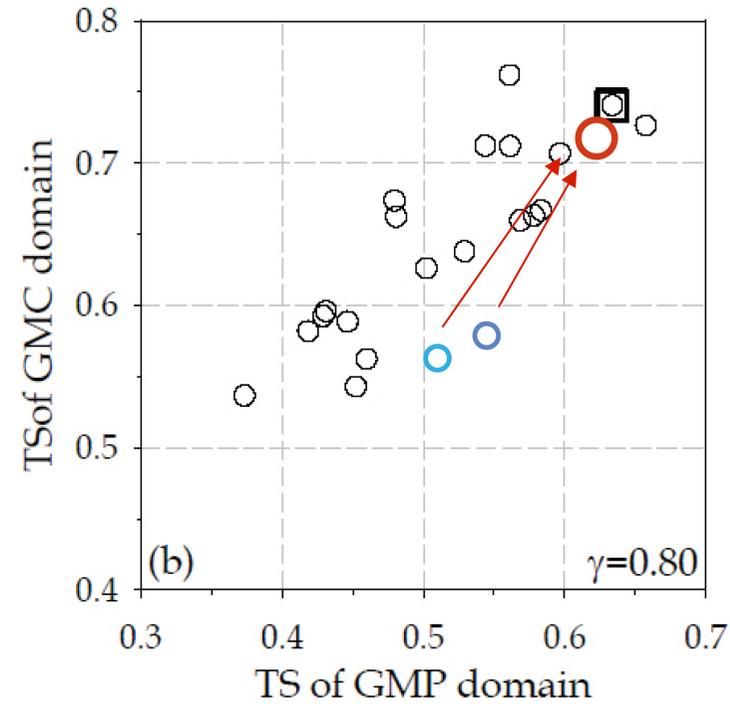
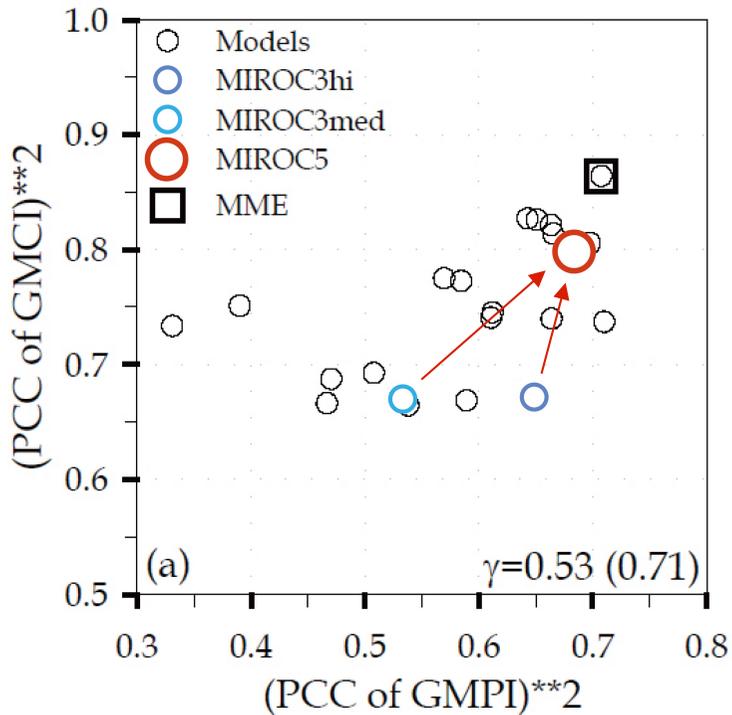
# Phase composite of OLR and horizontal velocity at 850hPa

## MIROC-AGCM(T42)



## AVHRR+NCEP





GMPI(Global Monsoon Precipitation Index)  
GMCI(Global Monsoon Circulation Index)

GMPI, GMCI=AR/AM  
AR=MJJAS(NDJFM)-NDJFM(MJJAS)  
AM=annual mean

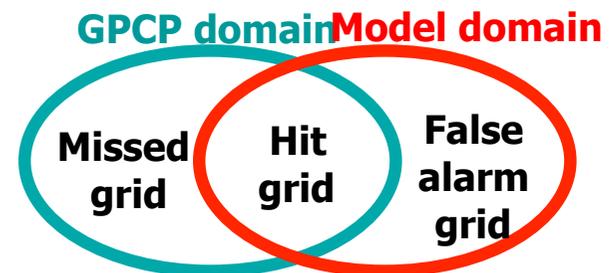
PCC: Pattern Correlation Coefficient  
with GPCP or NCEP reanalysis.

MME: multi-model ensemble

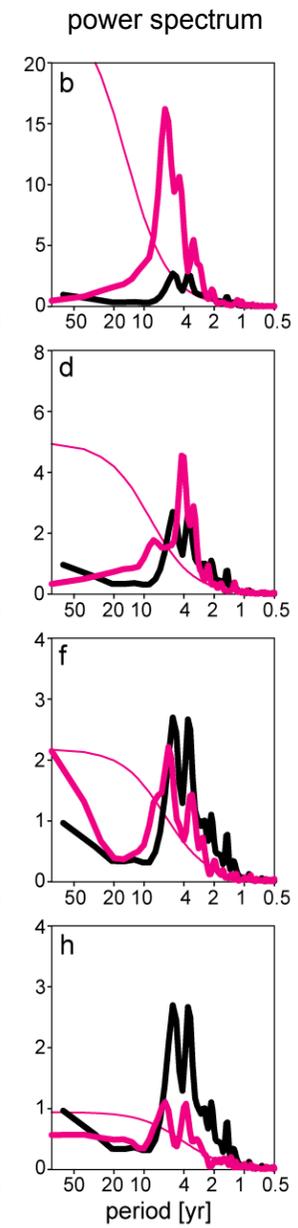
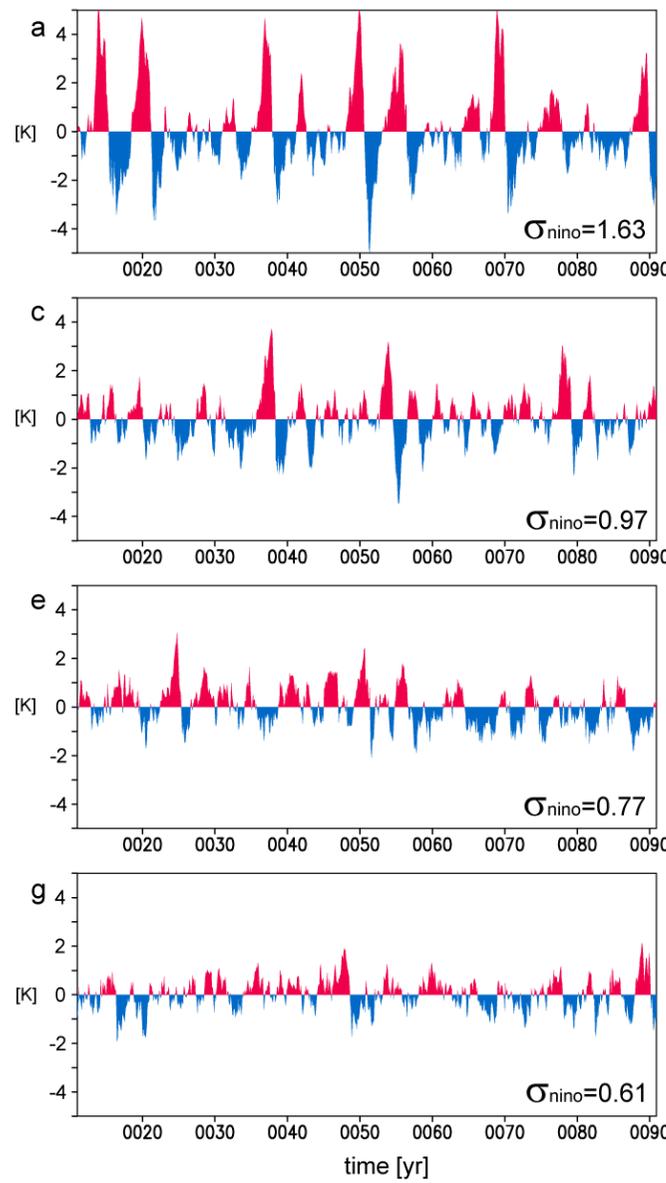
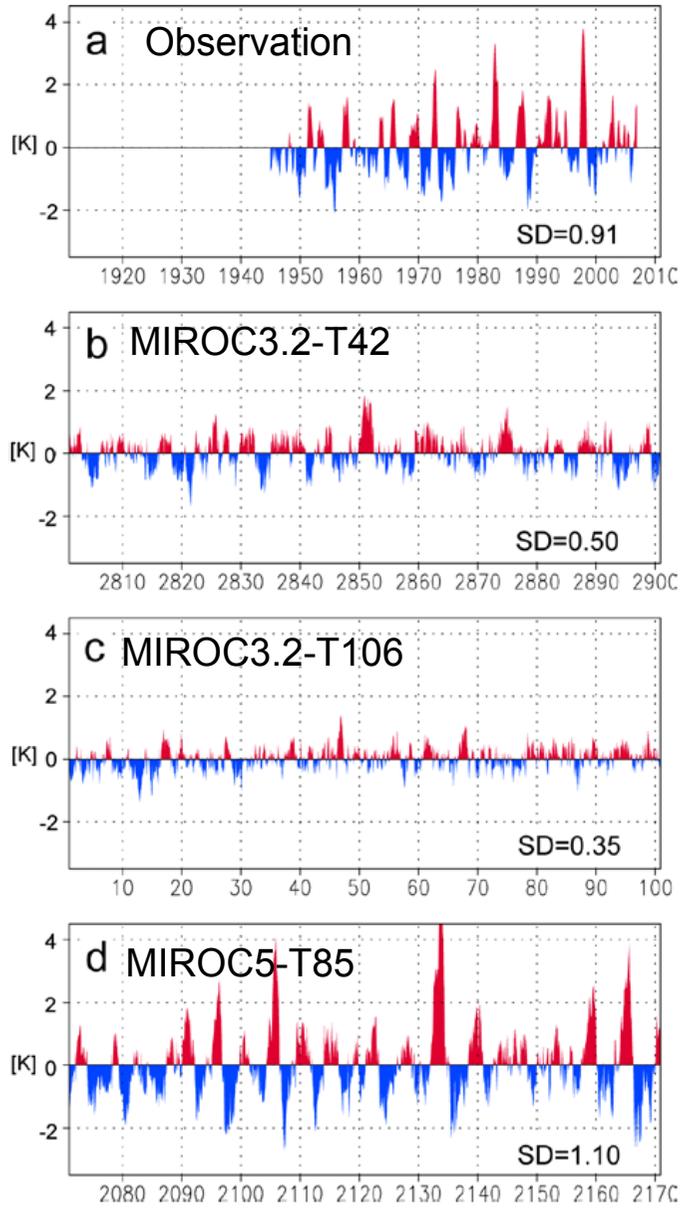
GMP domain:  
AR>2.5mm/day

GMC domain:  
AR>2.5m/s

Threat Score (TS) = hit/(hit+missed+false)



# Nino3 SST anomaly



$$\varepsilon = C \frac{B}{\hat{w}^2}$$

small C



large C

ENSO amplitude depends on the free parameter C in the cumulus scheme.

# まとめ

■本スキームの導入により、climateにおいてもvariabilityにおいても、これまで多くのGCMが苦しんできた問題点の多くが改善される。

- SPCZがより現実的に表現される。
- 東太平洋においてダブルITCZバイアスがなくなる。
- cumulus congestusが増加し、加熱の分布が下方にシフトする。
- モンスーンの再現性がよくなる
- 経験的なトリガリングメカニズムを用いることなく、赤道湿潤Kelvin波、季節内振動などの波動が表現される。等価深度も現実的な値が得られる。
- ENSOの振幅が改善される。

■経験的な定式化に頼らず、physically-based schemeである。

Backup

# Chikira-Sugiyamaスキームの概要

1. Entraining-plumeモデルを採用する。
2. 水平エントレインメント率はGregory (2001)に従い、鉛直に変化する。

$$\varepsilon \cong C_\varepsilon \frac{aB}{\overline{w}c^2}$$

3. Arakawa-Schubertスキームの精神を継承し、異なる雲タイプ(アップドラフトタイプ)がスペクトル的に表現される。雲底でのアップドラフト速度がある範囲にスペクトル的に分布していると考えerことで、スペクトル表現がつけられる。
4. 雲底マスフラックスは予報型Arakawa-Schubertスキームと同じ方法で求められる。

# 積雲パラメタリゼーションの歴史

	Kuo系列	Arakawa-Schubert系列	その他
1960			Manabe et al.(1965)
1970	Kuo (1974)	Arakawa and Schubert (1974)	
1980	Tiedtke (1989)		Betts and Miller (1986)
1990		Moorthi and Suarez (1992) Pan and Randall (1998)	Emanuel (1991)
2000	Gregory (2000)		
2010		Chikira and Sugiyama (2010)	

- 1970年代半ばには、基本的な型が出そろった。
- その後、様々な改良が試みられたが、性能面で大きな進歩はなかった。

## 経験的スキーム(エンジニアリング志向)

- 理由はわからないが、経験的に知られている関係を用いる。
- モデルの結果を観測にあうように調節しやすいため、現在気候の再現においては、良い結果を出す傾向にある。
- 用いられた経験式が、現在とは異なる気候においても通用するかどうか必ずしも明らかではない。温暖化の予測でこの方式が良いかどうかは論争的。
- 気象予測のためのモデルで採用される傾向にある。
- (例) Kuoスキーム

## 物理的スキーム(サイエンス志向)

- 物理法則に基づいた数理的なモデルを構築し、これを用いる。
- 現象の解明というサイエンスの目的に合致した方向。
- 現象を支配する物理過程の解明が難しいため、必ずしも良い性能とならない。
- 大学の研究で利用される傾向にある。
- (例) Arakawa-Schubertスキーム

Chikira-Sugiyamaスキームは、由緒正しい物理的スキームでありながら、世界最高レベルの高い性能を持つ(積雲スキームの歴史上初めて)。

# 雲のスペクトル表現

Gregory (2001)

$$\varepsilon = C_\varepsilon \frac{aB}{w_c}$$

- 雲内物理量の鉛直構造を求める際、境界条件として、雲底で物理量(T, q, w)を与える必要がある。
- 雲内物理量の鉛直構造は、雲底の物理量(T, q, w)に依存して変化する。

雲底でのアップドラフト速度が小さい(大きい)



エントレインメント率が大きい(小さい)

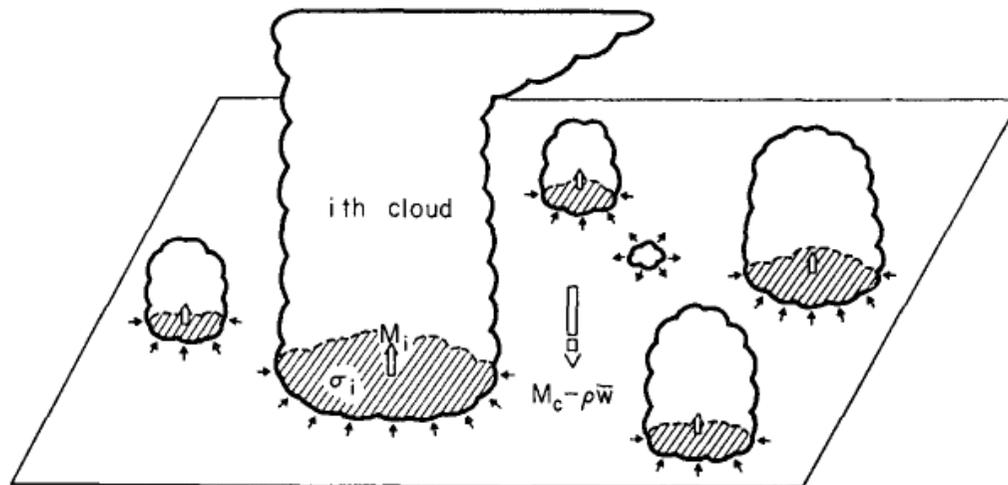


浅い積雲(深い積雲)の発生

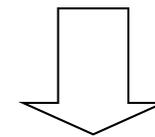
- 異なる強さのサーマル、重力波、ダウンドラフトや地形による持ち上げ等により、雲底でのアップドラフト速度はある範囲にスペクトル的に分布していると考えられる。
- 本スキームで採用されたエントレインメント率の定式化によれば、論理的な帰結として、「雲底でアップドラフト速度が異なる値を持つことで、異なる高さを持つ積雲が共存する」という結論が導かれる。
- この性質を利用し、本スキームでは、異なるアップドラフト速度がある範囲にスペクトル的に分布していると仮定し、雲のスペクトル表現をつくる。

$$W_{\min} < W \Big|_{z=z_b} < W_{\max}$$

$$W_{\min} = 0.1 [m / s] \quad W_{\max} = 1.4 [m / s]$$



雲サイズ→エントレインメント率

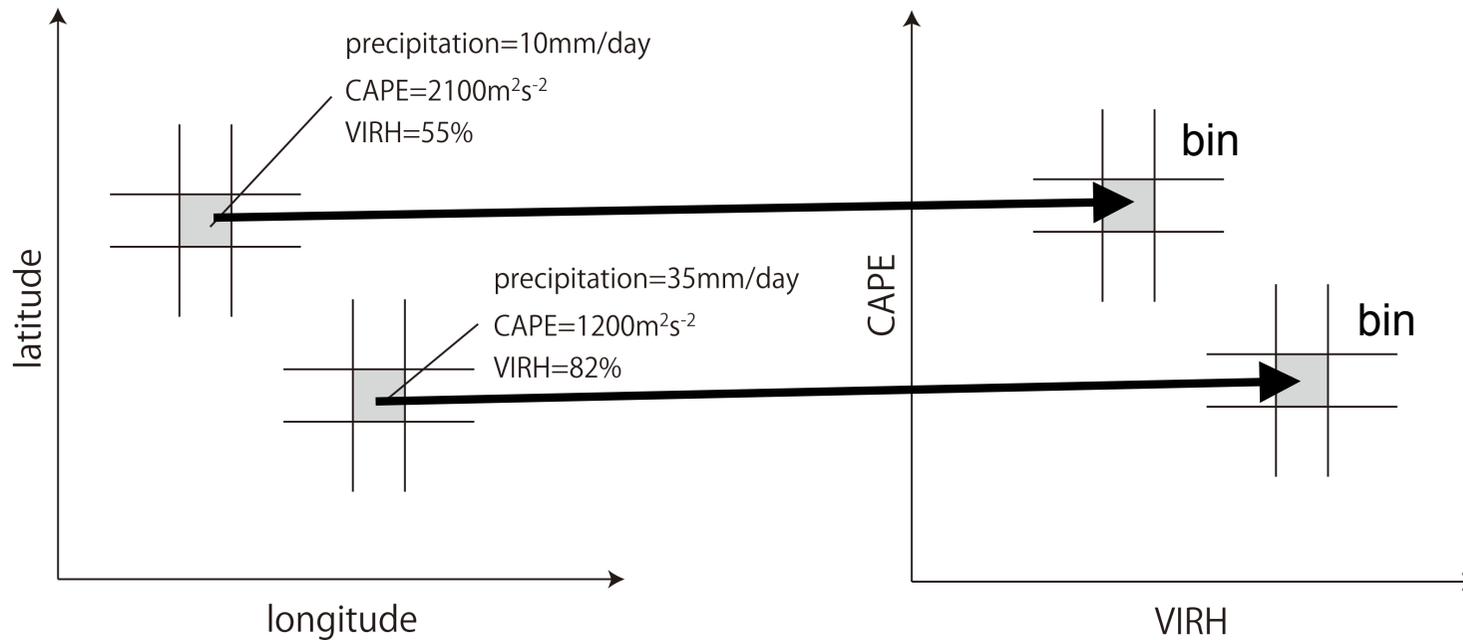


雲底でのアップドラフト速度  
→エントレインメント率

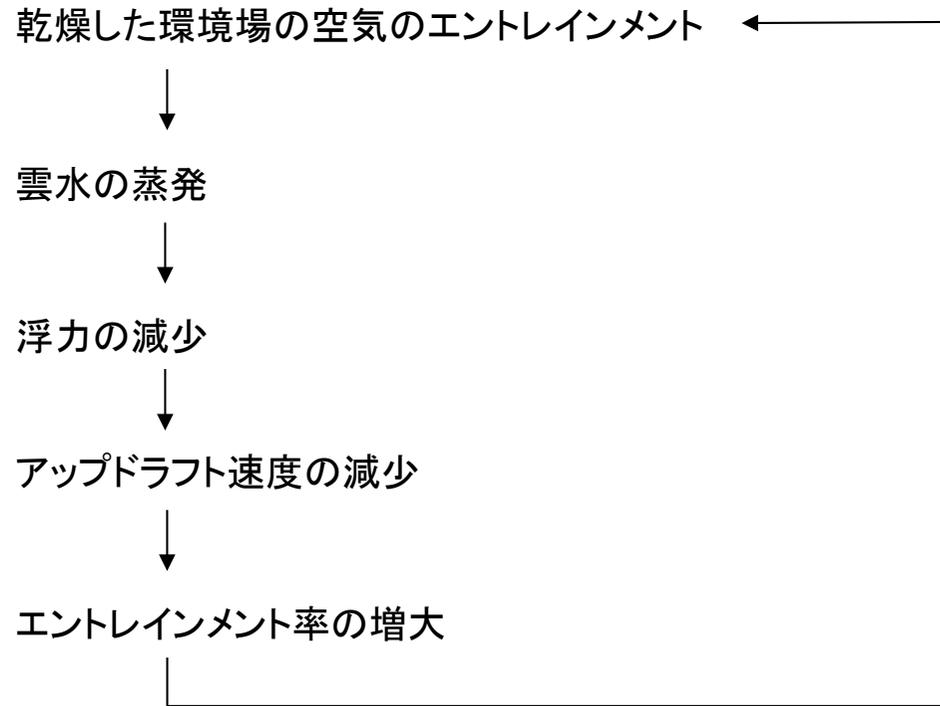
# 解析手法

- データ: 10年分の日平均出力
- 領域: 10S~10Nの海洋上
- 方法: CAPEとVIRHの二次元マップに、物理量をbinし、各binの平均をとる

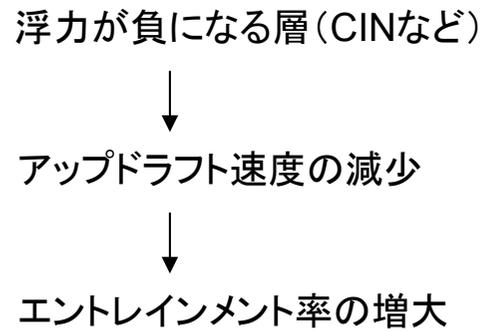
$$VIRH = \int_{300hPa}^{850hPa} q dp / \int_{300hPa}^{850hPa} q_s dp$$



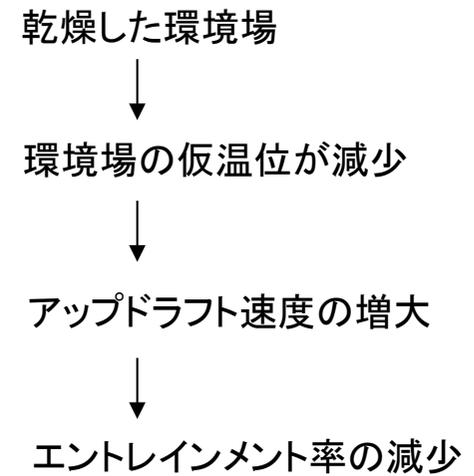
buoyancy effect



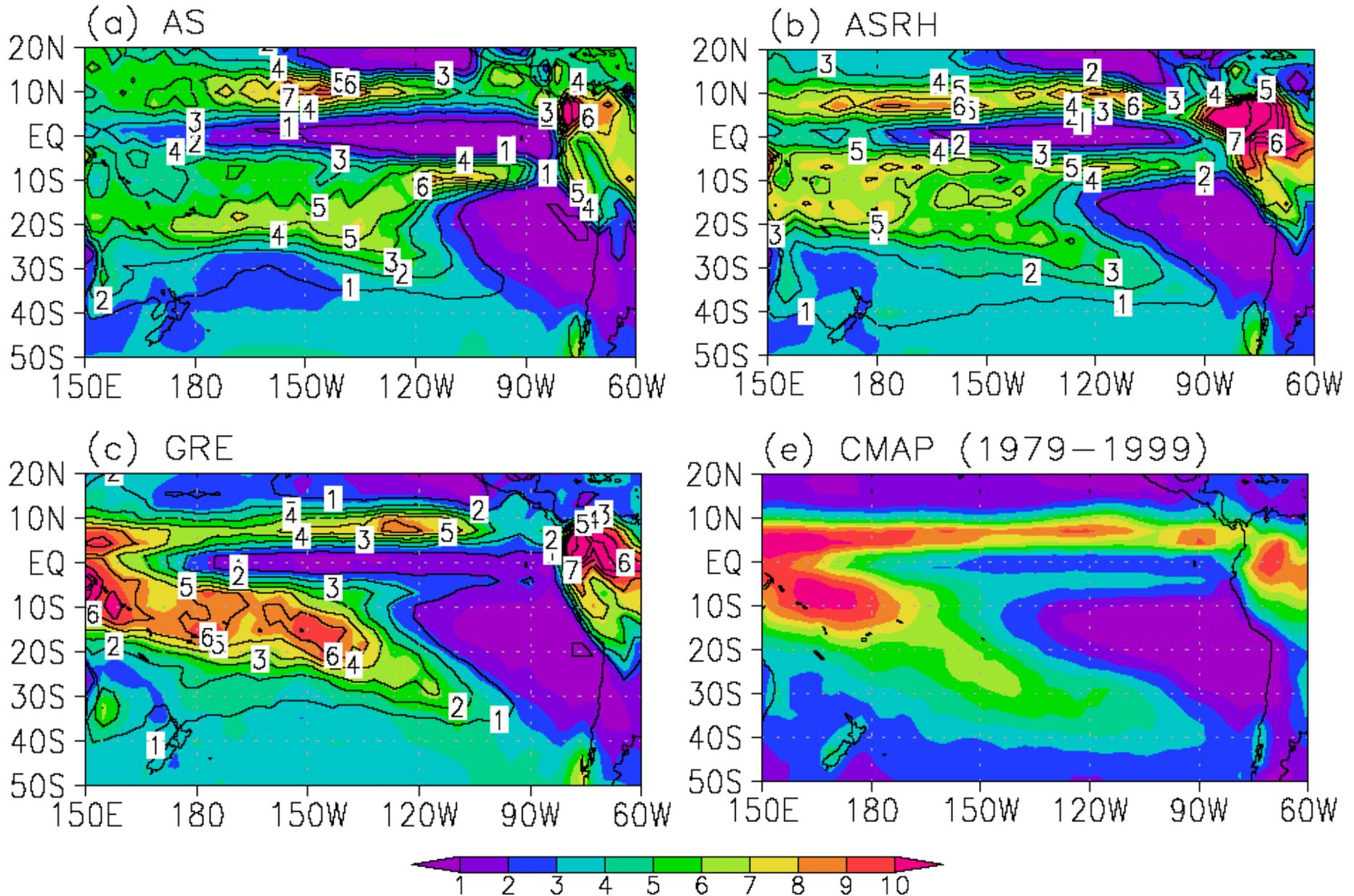
CIN effect



virtual temperature effect



MAM mean total precipitation (shading; mm/day)  
and cumulus-precipitation (contour; mm/day)



# Skill score based on Taylor (2001) for SON precipitation

(the season when the double ITCZ bias appears in many models)

$$S \equiv \frac{(1 + R)^4}{4(\hat{\sigma} + 1/\hat{\sigma})^2}$$

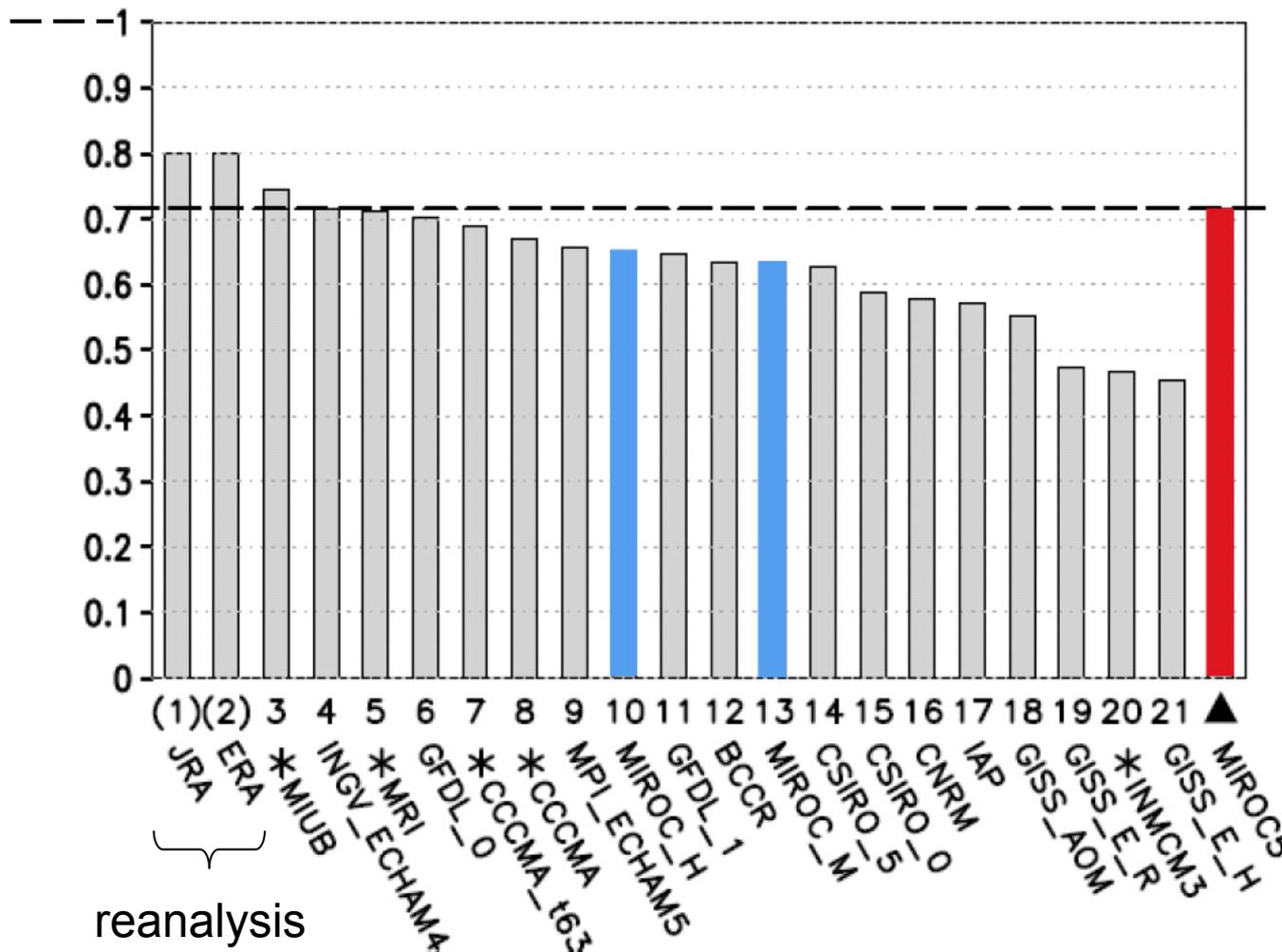
R: pattern correlation

$\sigma_m$ : spatial standard deviation for model

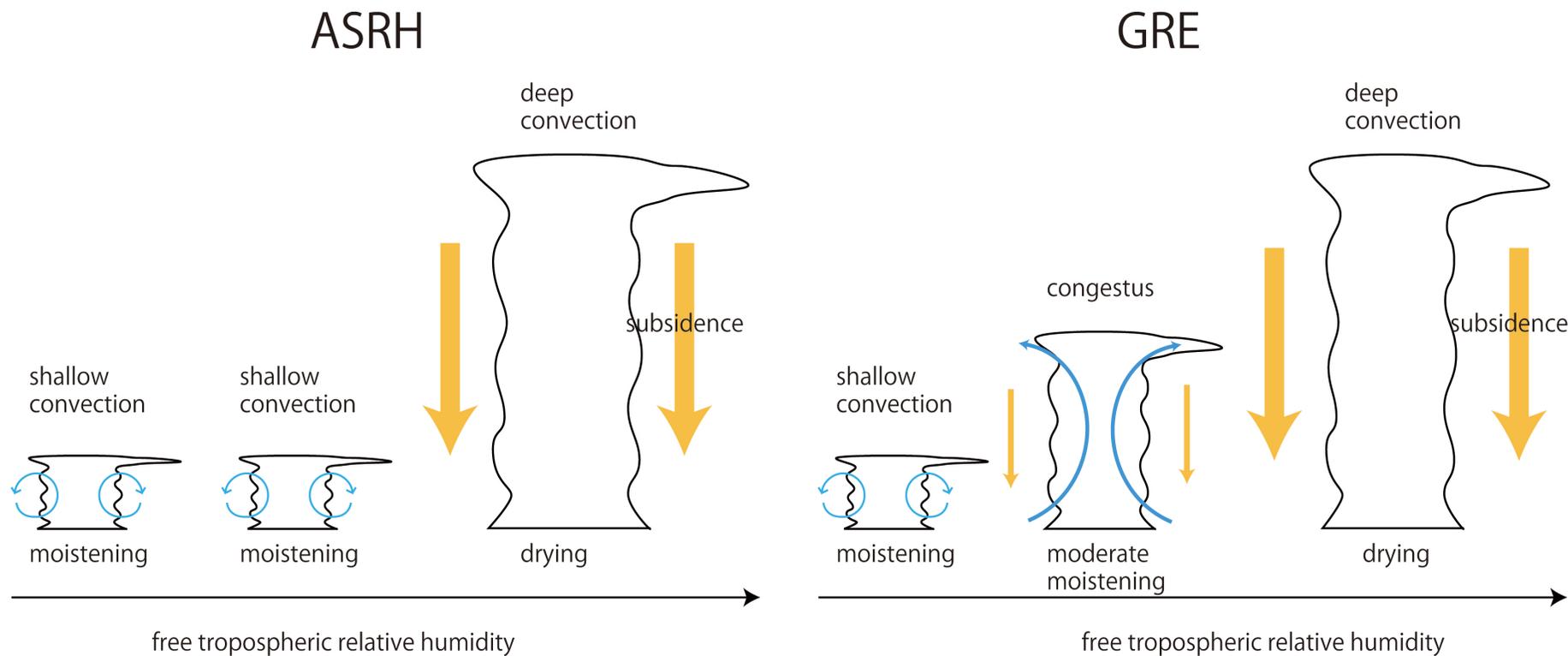
$$\hat{\sigma} \equiv \sigma_m / \sigma_r$$

$\sigma_r$ : spatial standard deviation for observation

TRMM  
observation



\*models with flux adjustment

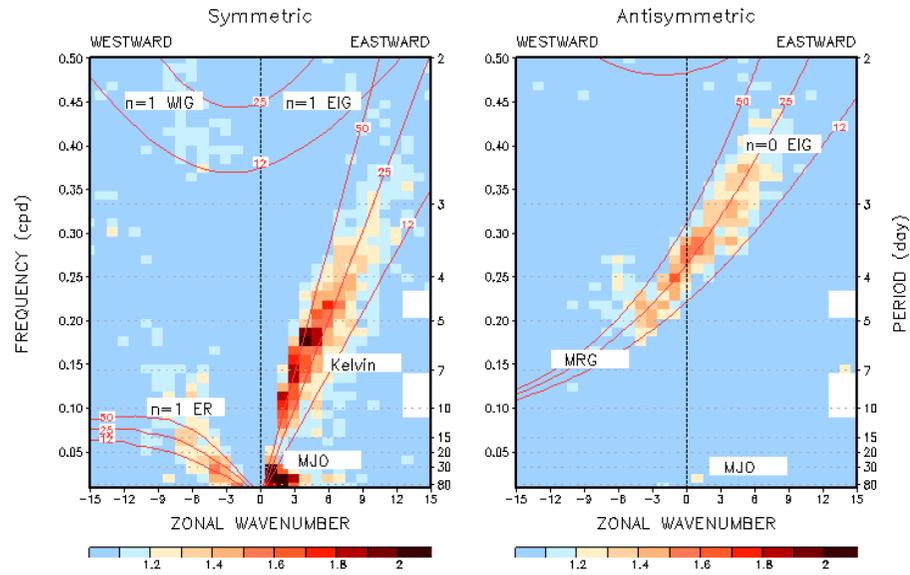


Chikira (2010) JAS

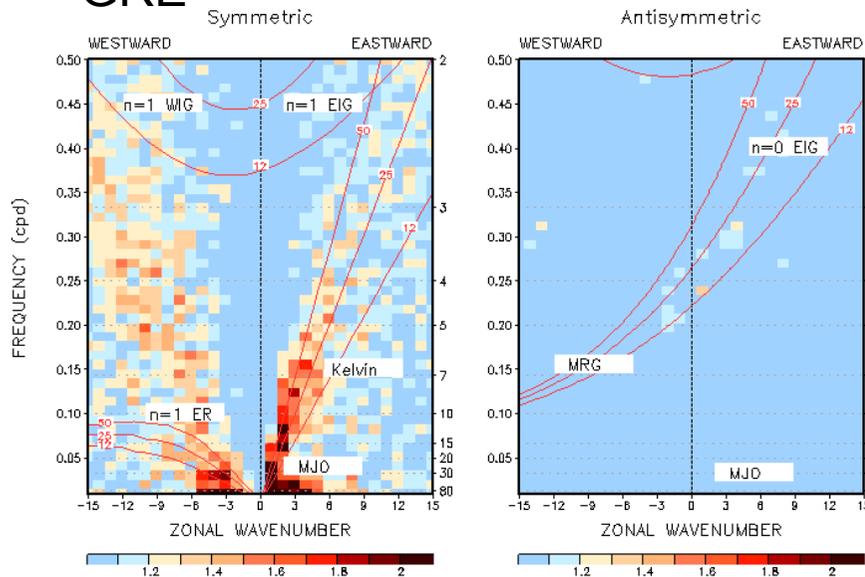
ダブルITCZバイアスを改善するには、以下の二つの条件が必要

- 自由大気が乾燥しているときに深い対流が抑制される。
- congestusがよく表現されている。

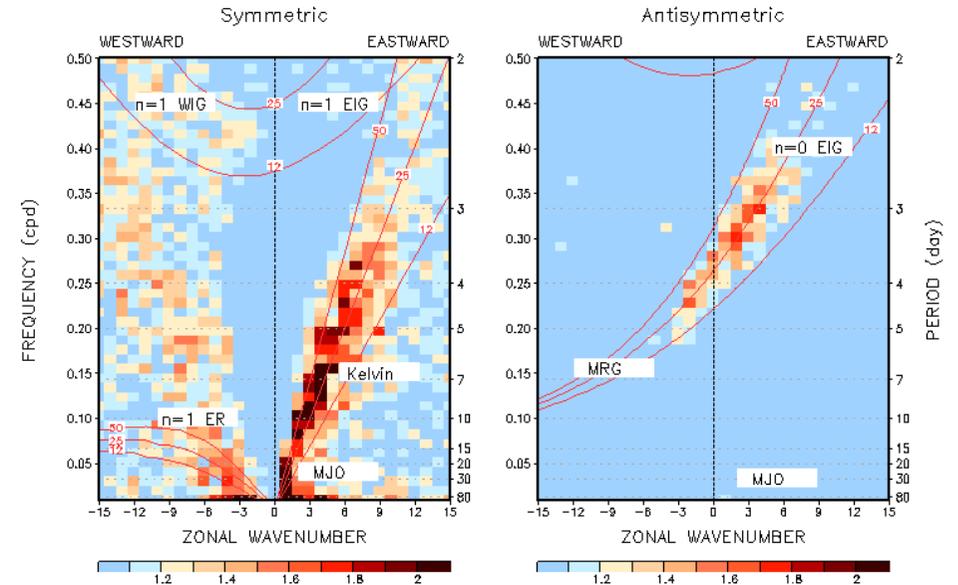
# 観測



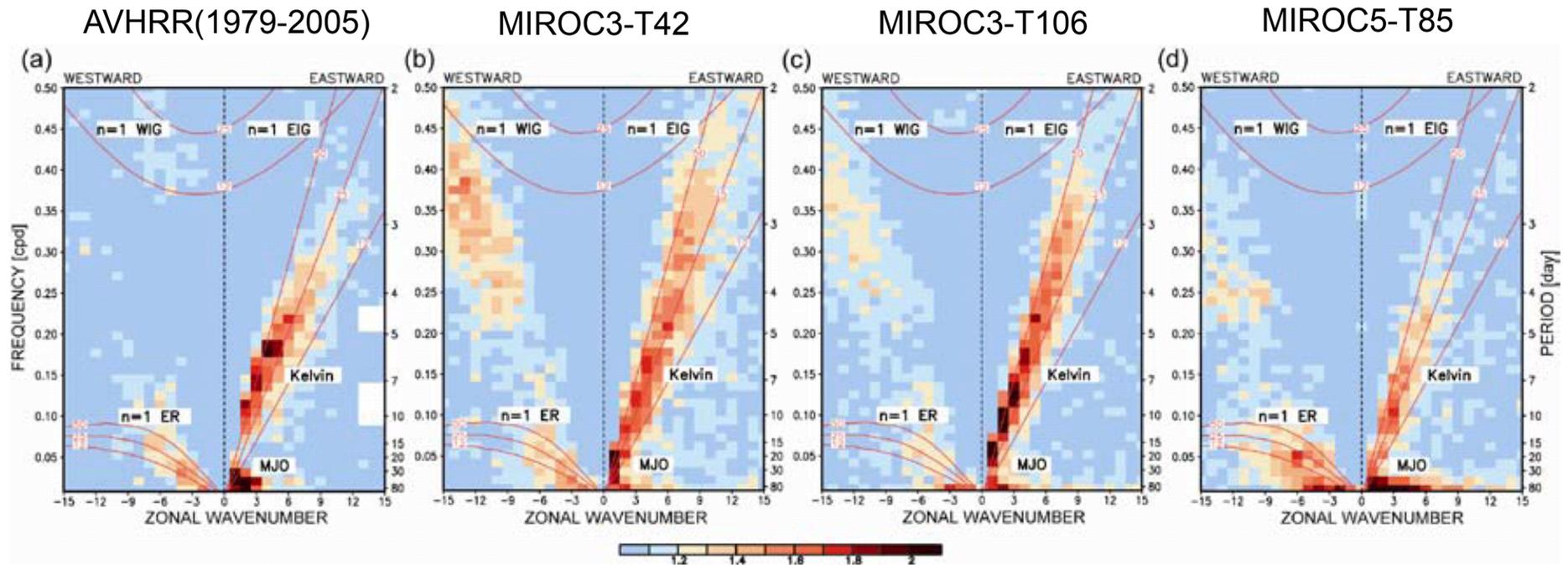
# GRE



# NSJ

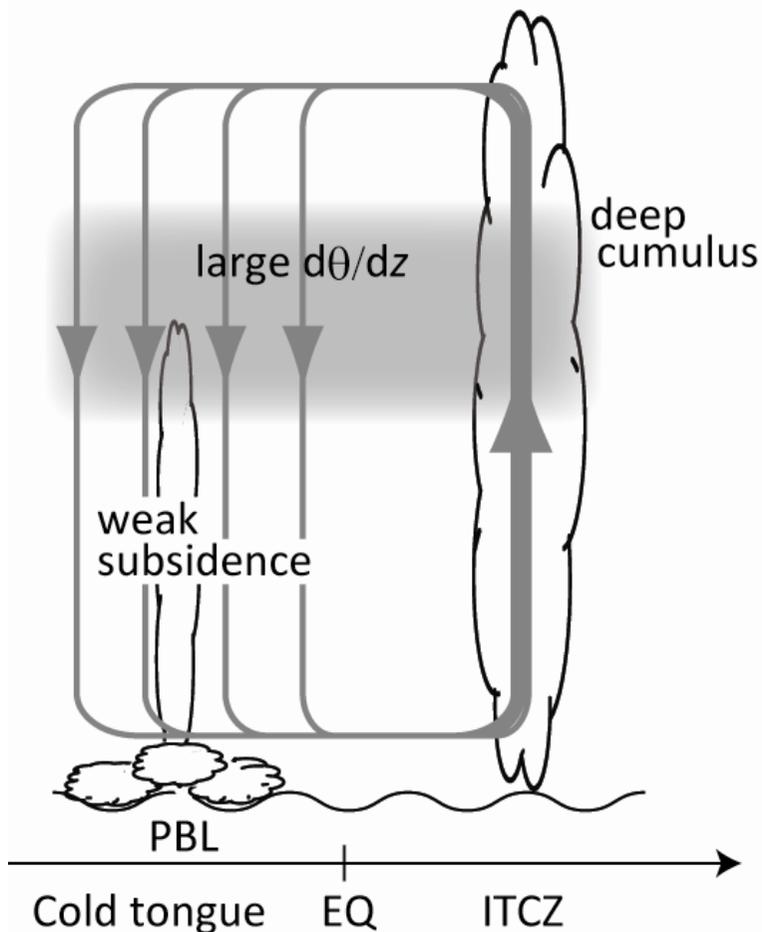


# Power spectrum of OLR divided by background power (Wheeler and Kiladis 1999)



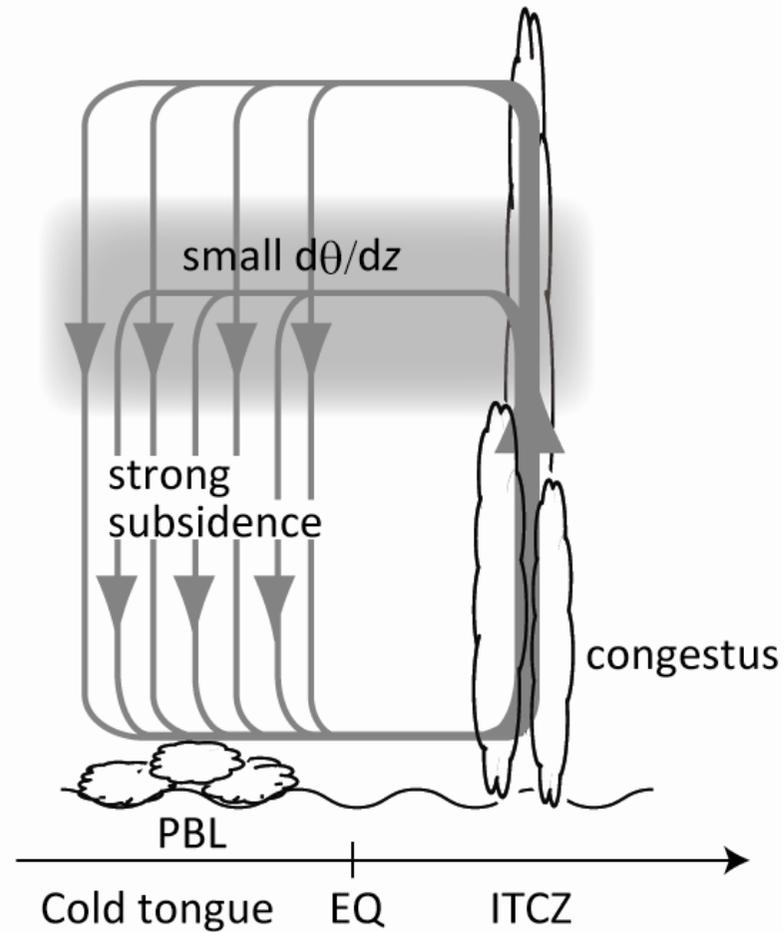
# Meridional circulation and cumulus activity over the eastern Pacific

(a) small C (strong ENSO)



deep convection tends to shift eastward  
→strong Bjerknes feedback

(b) large C (weak ENSO)



deep convection tends to shift westward  
→weak Bjerknes feedback